

微小機械のための潤滑技術確立に向けて

1. はじめに

機械の高精度化・長寿命化・省エネルギー化には、相対運動する機械要素間の安定的かつ正確な動作を実現する潤滑技術の確立が必須である。重力が支配的であるマクロな世界においては、物体を動かす際の最大の制約条件の一つは物体のもつ荷重である。したがってマクロな摩擦現象は、「摩擦力は荷重に比例する」というアモントン・クーロンの法則により定式化され、その比例係数である摩擦係数が潤滑設計における重要な評価パラメータとなる。ゆえにマクロな機械の潤滑においては、いかに低い摩擦係数を実現するか、換言すれば、荷重を支えつついかに摩擦力を低減させるかが課題となる。

いっぽう、マイクロスケールやナノスケールまで微小化する機械要素においては、摩擦力や凝着力などの表面力が支配的となり、重力の影響は無視できる程度にまで小さくなる。そしてミクロな機械要素を安定的に動作させるうえで最大の制約条件は、狭小化した機械要素間のすき間である。機械システムを微小化・集積化するためには、必然的に機械要素間のすき間の狭小化が必要であり、ゆえに、微小機械のための潤滑技術の確立には、いかに小さいすき間において摩擦力の低減を実現するかが課題となる。しかし、潤滑特性を評価するために従来用いられてきた各種の測定方法は、主に荷重に対する摩擦力の依存性を評価するものであり、マイクロ・ナノメートルオーダーの微小すき間において摩擦現象の解析については、その評価法さえ確立されていない。

そこで本研究では、液体潤滑剤を対象として、それが微小すき間においてせん断された際の力学特性（粘弾性特性）を解明することを目的とし、新規なせん断力測定法を開発したのでここに紹介する。

2. 光ファイバプローブを用いた超高感度せん断力測定法

微小すき間においてせん断される液体潤滑剤の粘弾性特性を測定するために、感度 0.1nN オーダのせん断力測定

と、分解能 0.1nm オーダのすき間制御を両立する新規なせん断力測定法を確立した。概略図を図 1 に示す。本法は摺動子として先端を球形状に加工した光ファイバプローブを用いることを特徴とする。基板に対して垂直に配置したプローブを piezoelectric actuator により駆動し、その先端の球（先端球）により基板上に塗布された液体潤滑剤を摺動する。先端球の直径は約 200 μm と微小である。

液体潤滑剤は基板表面と先端球表面のすき間に挟まれた状態でせん断され、そのとき先端球にはたらくせん断力は、ファイバのたわみを検出することにより測定する。基板に対して垂直に配置された光ファイバプローブはせん断方向には柔軟であるが、すき間方向には剛性が高い。これは高感度なせん断力検出と精密なすき間制御の両立が可能であることを意味し、すき間の調整にフィードバック駆動の piezoelectric actuator を用いることにより 0.1nm オーダのすき間制御を実現している。

高感度なせん断力測定を実現するには、ファイバのたわみを高感度に検出することが必須である。そのため、先端球を球レンズとして用いる新規な変位測定法を考案した。具体的には、先端球を用いてレーザービームを集光し、光位置センサ上にレーザースポットを形成する。ファイバのたわみは、レーザースポットの位置を検出することにより測定することができる。

この測定法により、検出下限において 10 μm オーダの高感度なたわみ測定を実現した。これは、力感度に換算すると 0.1nN オーダに相当する。

3. 微小すき間における液体潤滑剤の粘弾性特性

図 2 には本測定法を用いて測定した液体潤滑剤の粘弾性特性のすき間依存性を示す。数十 nm 以下のすき間では、すき間の狭小化に伴って粘性が増大し、最も狭い数 nm オーダのすき間においてはバルク状態に比べて約 30 倍の粘性を有することが明らかとなった。また、バルク状態では無視できる程度に小さい弾性が 4nm 以下のすき

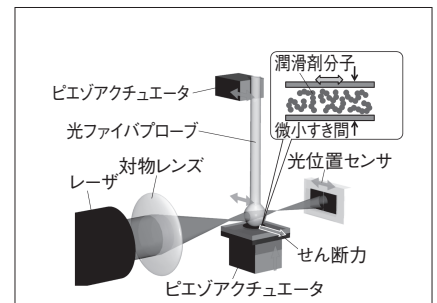


図 1 光ファイバプローブを用いた超高感度せん断力測定法

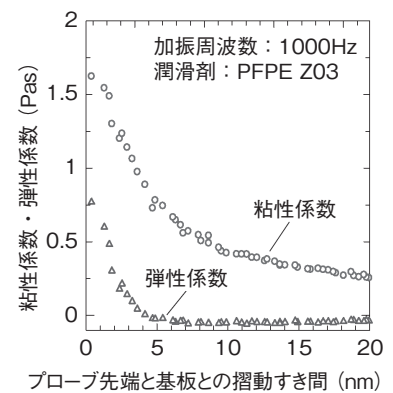


図 2 ナノメートルオーダーの微小すき間における液体潤滑剤の粘弾性特性

間において急増した。さらに、これらの粘弾性特性のすき間依存性は潤滑剤分子の分子構造、たとえば極性の末端基の有無に大きく依存することを明らかにした⁽¹⁾。

4. おわりに

本結果は微小機械のための潤滑技術の確立には、微小すき間における潤滑剤に特有の力学特性を解明することが重要な課題の一つであることを示唆している。今後は、せん断速度や環境温度などのさまざまな摺動条件が、微小すき間において特有の力学特性に与える影響を明らかにするとともに、そのメカニズムについて分子レベルでの解明を試みたい。

(原稿受付 2008年9月24日)

[伊藤伸太郎 名古屋大学]

●文献

- (1) Itoh, S., Fukuzawa, K., Hamamoto, Y., Zhang, H. and Mitsuya, Y., Fiber Wobbling Method for Dynamic Viscoelastic Measurement of Liquid Lubricant Confined in Molecularly Narrow Gaps, *Tribology Letters*, 30 (2008), 177-189.